

离心叶轮非轴对称轮盘面气动敏感性分析

姬成, 黄兆骞, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了研究非轴对称轮盘面对高压比离心叶轮的效率、压比、堵塞流量及工况范围的影响规律,采用基于人工神经网络的非轴对称轮盘面全工况预测模型,用于预测 30 个形状控制参数下轮盘面对气动性能的影响。同时,结合 Sobol 敏感性分析方法,提取对各性能指标影响显著的敏感参数,研究了敏感参数对于叶轮性能的影响规律。结果表明:轮盘面对效率、压比及堵塞流量的控制主要取决于各个参数独立影响的线性叠加,进口附近轮盘面的凹陷有利于提升最高效率并增大堵塞流量;叶轮出口压力侧分流流道附近的凸起有利于最高效率的提升,但会降低叶轮的压比。不同的是,轮盘面对叶轮流况范围的影响主要源于 3 个及以上参数的高阶交互作用。利用敏感性分析结果,从经验上人为给定控制参数的取值,实现了离心叶轮非轴对称轮盘面快速优化,在设计点压比不变的情况下,使绝热效率提升了 0.9%,工况范围提升了 2%,说明敏感性分析可以有效缩短优化周期,从而降低优化成本。该研究结果可为今后的离心叶轮气动设计及优化提供方向性指导。

关键词: 离心叶轮;非轴对称轮盘面;Sobol 敏感性分析;代理模型;优化设计

中图分类号: V232.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302007 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0057-10

Analysis on Aerodynamic Sensitivity of Non-Axisymmetric Hub of Centrifugal Impeller

Ji Cheng, HUANG Zhaoqian, Xi Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the influence of the non-axisymmetric hub on the efficiency, pressure ratio, mass-flow of choke and flow range of high-pressure-ratio centrifugal impeller, an artificial neural network (ANN)-based full range prediction model of non-axisymmetric hub is adopted to predict the influence of non-axisymmetric hub on aerodynamic performance under 30 shape control parameters. With Sobol sensitivity analysis method, the sensitive parameters that have significant impact on performance are extracted and studied for their influence on the impeller performance. The results show that the control of the efficiency, pressure ratio and mass-flow of choke by hub surfaces mainly depends on the linear superposition of independent effects of each critical parameter. The concave surface of the hub near the impeller inlet is favorable to improve the maximum efficiency and increase the mass-flow of choke, while the convex surface of the hub near the impeller outlet at the channel of pressure side is conducive to the improvement of the maximum efficiency, but it reduces the pressure ratio of the impeller. In contrast, the influence of the hub de-

收稿日期: 2022-05-21。 作者简介: 姬成(1996—),男,博士生;席光(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家重大科技专项资助项目(2017-II-0002-0014)。

网络出版时间: 2022-09-05

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220902.1551.002.html>

formation on the flow range of the impeller is mainly caused by complex high-order interaction of 3 or more parameters. Based on the results of the sensitivity analysis, the values of the control parameters are manually determined, thereby realizing rapid optimization of the non-axisymmetric hub of the centrifugal impeller, increasing the isentropic efficiency by 0.9% and the flow range by 2% with the designed pressure ratio remaining unchanged. This indicates that the sensitivity analysis effectively shortens the optimization period and reduces optimization costs. This research provides directional guidance for the aerodynamic design and optimization of centrifugal impellers in the future.

Keywords: centrifugal impeller; non-axisymmetric hub; Sobol sensitivity analysis; agency model; design optimization

随着当今航空发动机小型化、高推重比的发展趋势,单级高压比离心压气机的设计及制造正逐渐成为迫切的需求。当设计压比增大时,为了保证叶轮工作在合理的比转速以及能量头系数下,同时满足材料强度以及发动机尺寸的限制,叶轮进口通常工作在跨声速区,叶尖相对马赫数超过 1,并且在叶轮通道内出现激波,对叶轮内部流动造成复杂影响,造成叶轮性能的恶化^[1-4]。Rogers^[5]研究了一系列航空用压比为 8 的离心压气机,结果表明,随着压比的升高,离心压气机的效率及工况范围都将明显下降,必须合理地确定设计参数才能满足设计需求。在这样的背景下,传统的准三元叶轮设计手段已经难以满足当代航空发动机对高压比叶轮的效率及工况范围的需求,因此有必要扩大叶轮的设计空间,利用更多的控制参数进行优化设计,以寻求更加精细的内部流动组织方案,提升叶轮的性能。

到目前为止,对于离心叶轮的参数化优化设计主要聚焦于叶片造型^[6-11],而较少关注轮盘面造型对叶轮性能的影响。针对这一问题,Ji 等^[12-13]建立了离心叶轮非轴对称轮盘面参数化模型,并分别在低压比叶轮(压比为 4)和高压比叶轮(压比为 11)上实现了非轴对称轮盘面优化,结果表明:在低压比叶轮中,非轴对称轮盘面使叶轮在小流量工况下的效率和失速裕度得到了提升,但总体影响程度小于叶片造型;而在高压比叶轮中,非轴对称轮盘面能够改善叶轮进口段的激波-泄漏流以及叶轮出口段的角区流动,从而使叶轮的设计点效率提升了 1%,工况范围提升了 2%。这说明对于高压比离心叶轮,非轴对称轮盘面有望成为一种简单、有效且可靠的被动流动控制手段。

但需要注意的是,引入非轴对称轮盘面后,叶轮内部空间由旋成空间变为了任意空间,必须使用相

互独立的全三维坐标系进行描述,无法使用简化的准三维模型为轮盘面的设计提供指导,只能采用优化手段进行参数寻优。而在高压比叶轮中,由于进口激波的影响,主叶片数目一般较少,在单流道中轮盘面的面积占比较大,一般需要 30 个以上的参数进行形状控制,这提高了轮盘面设计的成本。

为了缩短优化周期、降低设计成本,进一步发掘非轴对称轮盘面在高压比离心叶轮上的作用机理,有必要通过敏感性分析的手段提取轮盘面的关键控制参数,为以后的设计提供方向性的指导。敏感性分析可分为局部^[14-17]和全局敏感性分析^[18-20],局部敏感性分析可以简单、快速地考察单个变量对模型输出的影响,而全局敏感性分析在此基础上还考虑了不同参数的交互作用对模型输出的影响。由于叶轮内部各处流动与其上下游的几何形状息息相关,因此控制参数间可能存在着交互作用,应当采用全局敏感性分析的手段加以分析。Sobol 法是一种基于方差分解的全局敏感性分析方法^[21-24],该方法通过计算各参数的不确定度对模型总方差的贡献来估计参数及参数间交互作用的敏感度,具有直观的统计学含义,并且敏感性的计算独立于输入-输出关系的具体形式,被广泛应用于具有高度非线性关系的模型分析中。

本文的主要工作是对文献[13]所建基于人工神经网络(ANN)的非轴对称轮盘面全工况预测模型(full range prediction model)进行 Sobol 敏感性分析,提取轮盘面的关键控制参数,并利用敏感参数实现快速的经验优化。

1 研究方法

1.1 基线叶轮及轮盘面参数化方法

本文所研究的基线叶轮是经过初步设计、流量为 $6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 、压比为 11 的高压比离心叶轮,叶轮出

口采用等宽度无叶扩压器,扩压器出口在1.6倍叶轮出口半径处,如图1所示,由数值计算得到的该叶轮的级性能曲线如图2所示。本文涉及的具体设计参数和数值模型的配置及验证参考文献[13]。

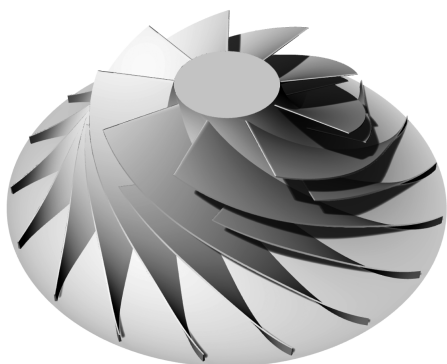
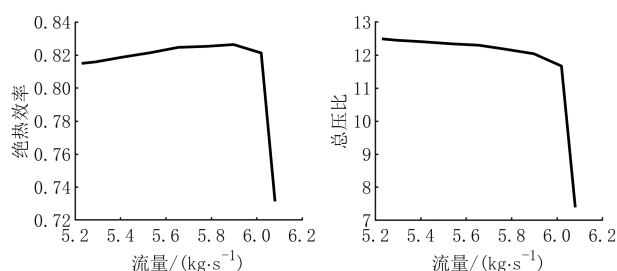


图1 基线叶轮

Fig. 1 Baseline impeller



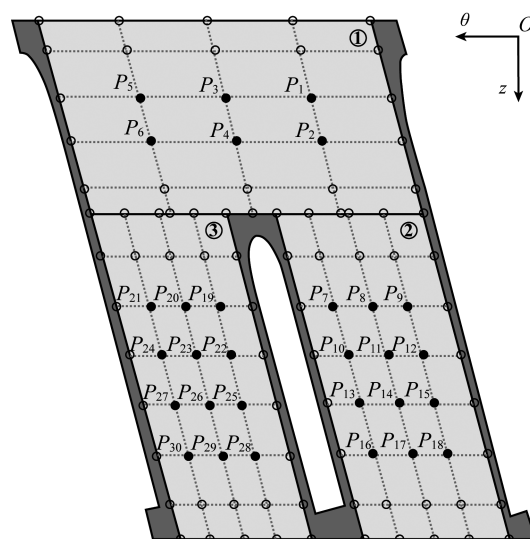
(a) 绝热效率

(b) 总压比

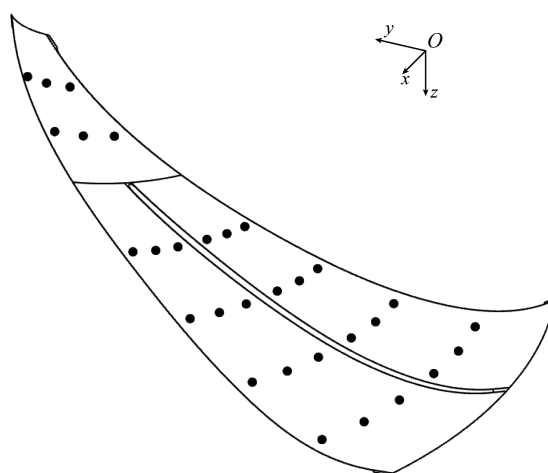
图2 基线叶轮的级性能曲线

Fig. 2 Stage performance of the baseline impeller

轮盘面的参数化方法如图3所示,图3(a)中轮盘面被划分为6个区域,所标的区域1、2、3为形状控制区域,其余区域为包裹叶片的非规则区域。通过非均匀有理B样条(NURBS)曲面对形状控制区域进行重建,并使用NURBS控制点控制曲面的凹凸形状,实现轮盘面的参数化造型。为了保证计算域的封闭性,与叶片相接处的控制点不会被移动;为了保证叶轮与进出口段的光滑连接以及区域1、2、3之间的光滑连接,与连接处相邻的两层控制点不会被移动。因此,最终选取30个控制点控制轮盘面的形状,这30个控制点的位移方向与其所在流向位置处叶片的倾斜方向相同,其中指向叶顶的取正值(凸起),反之取负值(凹陷),最终确定30个控制参数 $P_1 \sim P_{30}$,其取值范围如表1所示,各参数的取值范围是依据对应控制点所在位置的叶片高度给定的。



(a) 轮盘面区域划分示意图



(b) 控制参数的实际分布

图3 轮盘面参数化方法

Fig. 3 Parameterization method of hub

表1 控制参数取值范围

Table 1 Ranges of control parameters

控制参数	取值范围/mm
P_1, P_2, P_5, P_6	-11.5~11.5
P_3, P_4	-13~13
$P_7, P_8, P_9, P_{19}, P_{20}, P_{21}$	-10~10
$P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{22}, P_{23}, P_{24}$	-9~9
$P_{13}, P_{14}, P_{15}, P_{25}, P_{26}, P_{27}$	-8~6
$P_{16}, P_{17}, P_{18}, P_{28}, P_{29}, P_{30}$	-8~5

1.2 代理模型

本文所用代理模型被称为全工况预测模型^[13],不同于传统预测模型仅能预测给定工况点的性能,该模型能够在给定几何参数下预测完整的性能曲线,因

此在最高效率及工况范围的预测上有更好的效果。全工况预测模型由两个 ANN 子模型组成,分别为堵塞模型、工作模型,如图 4 所示。当给定一组几何参数时,首先由堵塞模型预测在这组参数下叶轮的最大流量(输入几何参数,输出最大流量),然后以最大流量为起点,由工作模型计算不同流量下的性能(输入几何参数和流量,输出性能),最后以压比斜率大于 0 为判据终止预测,其中 P_R 为当前步的压比, p_r 为中间变量,存储上一步的压比,用于计算压比斜率 p_k 。使用全工况预测模型,可得最大流量、最高效率、工况范围和设计点效率及压比等叶轮的关键性能指标。

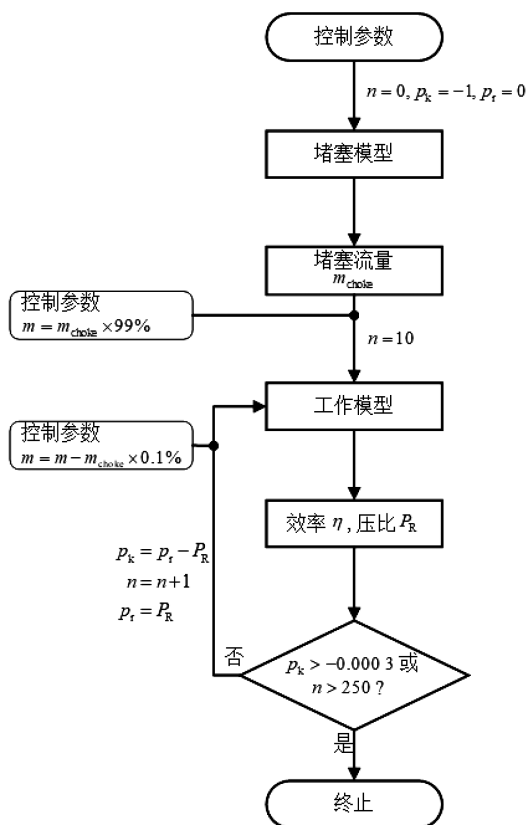


图 4 全工况预测模型

Fig. 4 Full range prediction model

为了训练堵塞模型及工作模型,共通过数值模拟计算了 616 组控制参数下叶轮的性能曲线,总共包含 4 824 个工况点,这些工况点被随机划分为训练集(70%工况点)、验证集(15%工况点)以及测试集(15%工况点)。训练集直接参与模型的训练,验证集在模型训练过程中提供评价,防止模型过拟合,测试集不参与训练过程,仅在模型训练完成后用于最终评估模型的泛化能力。最终,堵塞模型在测试集上的均方误差为 7.6503×10^{-5} ,工作模型在测试集上的均方误差为 3.4311×10^{-5} ,此时模型的精度

已经能够满足研究需求。

为了直观地展示模型的预测能力,对随机生成的 6 个叶轮进行了预测,并与数值计算的结果进行比对,结果如图 5 所示,其中实线表示模型预测值,与实线同色的圆点表示对应的数值计算结果。由图 5 可以看出,数值计算结果能够比较均匀地分布在模型预测值附近,并且模型预测值能较准确地捕捉性能曲线的趋势,这说明本文所用代理模型能够较为准确地反映一定控制参数下叶轮的实时性能。

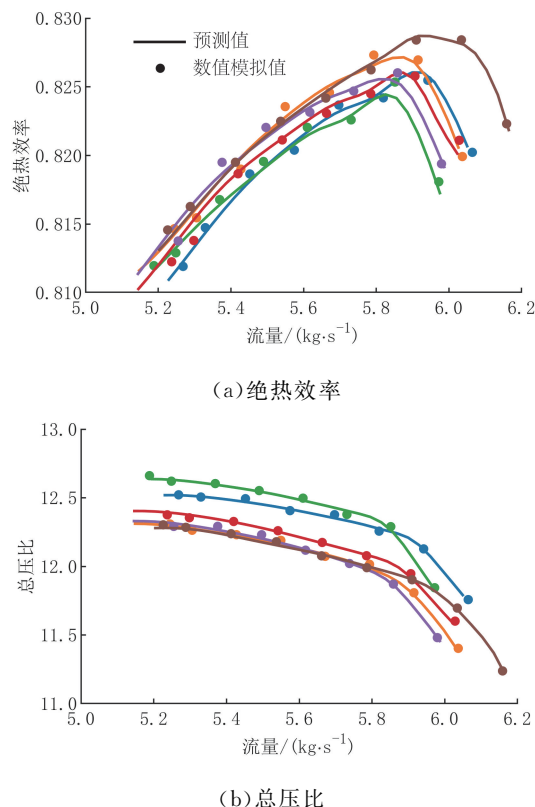


图 5 6 个随机生成的叶轮的性能预测

Fig. 5 Performance prediction results of 6 randomly generated geometries

1.3 Sobol 方法

从黑箱的角度看,任意模型均可被视为一个函数 $Y=f(\mathbf{X})$,其中 $\mathbf{X}$ 表示一个 d 维的模型输入 $\{X_1, X_2, \dots, X_d\}$, Y 表示模型的一个输出,是一个标量(对于多输出的模型,可进行多次独立的敏感性分析)。假设模型的输入参数独立且均匀地在单位超立方空间中取值,对于一般的参数空间,可通过参数变换满足要求,即 $X_i \in [0, 1], i=1, 2, \dots, d$,那么 $f(\mathbf{X})$ 可写为^[21]

$$Y = f_0 + \sum_{i=1}^d f_i(X_i) + \sum_{i < j}^d f_{ij}(X_i, X_j) + \dots + f_{1,2,\dots,d}(X_1, X_2, \dots, X_d) \quad (1)$$

式中: f_0 为常数; f_i 为 X_i 的函数; f_{ij} 为 X_i, X_j 的函数。以此类推,该分解的条件为

$$\int_0^1 f_{i_1 i_2 \dots i_s}(X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_s}) dX_k = 0, k = i_1, \dots, i_s \quad (2)$$

则该分解中所有基函数均正交,即

$$\begin{cases} f_0 = E(Y) \\ f_i(X_i) = E(Y | X_i) - f_0 \\ f_{ij}(X_i, X_j) = E(Y | X_i, X_j) - f_0 - f_i - f_j \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 f_i 表示仅受 X_i 影响而变化的部分,也称为 X_i 的主效应,而 f_{ij} 表示排除 X_i, X_j 各自的主效应后,同时受 X_i, X_j 影响的二阶交互效应,更高阶的效应也有类似的定义。

假设 $f(\mathbf{X})$ 为平方可积函数,对式(1)进行平方积分后可得

$$\int f^2(\mathbf{X}) d\mathbf{X} - f_0^2 = \sum_{s=1}^d \sum_{i_1 < \dots < i_s} \int f_{i_1 \dots i_s}^2 dX_{i_1} \dots dX_{i_s} \quad (4)$$

式(4)等号左侧为 Y 的方差,右侧为一系列方差之和,可得方差分解形式

$$\begin{aligned} \text{Var}(Y) &= \sum_{i=1}^d V_i + \sum_{i < j} V_{ij} + \dots + V_{12 \dots d} \quad (5) \\ \begin{cases} V_i = \text{Var}_{X_i}(E_{X_{\sim i}}(Y | X_i)) \\ V_{ij} = \text{Var}_{X_{ij}}(E_{X_{\sim ij}}(Y | X_i, X_j)) - V_i - V_j \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)中 $X_{\sim i}$ 下标表示除 X_i 以外的其余所有变量。更高阶的形式可以此类推。式(5)表示模型输出的不确定性可以被分解为一系列输入及输入间的交互作用所产生的不确定性之和。

对式(5)两侧同除 $\text{Var}(Y)$,并定义

$$S_i = \frac{V_i}{\text{Var}(Y)}, S_{ij} = \frac{V_{ij}}{\text{Var}(Y)}, \dots, S_{12 \dots d} = \frac{V_{12 \dots d}}{\text{Var}(Y)} \quad (7)$$

式中: S_i 为一阶敏感度系数,或主效应系数; S_{ij} 为二阶效应系数。

为了衡量变量 X_i 对 Y 所能产生的全部影响,包括与 X_i 的一阶效应及与其相关的全部高阶效应,定义总效应系数

$$S_{Ti} = \frac{E_{X_{\sim i}}(\text{Var}_{X_i}(Y | X_{\sim i}))}{\text{Var}(Y)} = \frac{1 - \text{Var}_{X_{\sim i}}(E_{X_i}(Y | X_{\sim i}))}{\text{Var}(Y)} \quad (8)$$

本文利用 1.2 节的代理模型计算给定几何参数

下的叶轮级性能,使用文献[23]推荐的蒙特卡洛估计式结合 Sobol 准随机采样方法^[25]计算主效应系数、二阶效应系数及总效应系数。这些敏感度系数的计算总共需要调用代理模型 $N(2d+2)$ 次,其中 N 为随机采样数, d 为模型输入的维数。随机采样数过少可能会导致敏感度系数估算不准确,采样数过大则会消耗较多的计算资源,应根据初次计算得到的置信区间适当调整采样数。

2 非轴对称轮盘面气动敏感性分析

设置随机采样数为 4 096,则共需运行代理模型 253 952 次,最终得到了 30 个控制参数对 4 种性能指标(最高绝热效率、最高效率点对应的总压比、堵塞流量以及工况范围)的主效应系数、二阶效应系数以及总效应系数。由于各性能指标对应的二阶效应系数总和 $\sum S_{ij}$ 均小于 5%,说明各参数间的二阶效应较弱,对应的单项 S_{ij} (总共 435 项)的影响已经与模型预测误差处于同一量级,因此在分析时可以不考虑其影响,仅对主效应系数以及总效应系数进行分析。

2.1 效率敏感性分析

图 6 给出了不同控制参数对最高绝热效率的主效应系数 S_i 、总效应系数 S_{Ti} 以及总效应系数的置信区间。其中灰色部分为主效应系数,白色部分为除开该参数的主效应系数外,所有与该参数相关的高阶效应系数之和,反映的是该参数的高阶效应所占的比重,且 $\sum S_i = 0.9169$, $\sum S_{Ti} = 1.1347$ 。由图 6 可知,控制参数对效率的影响以一阶效应为主,主要控制参数分布在叶轮进口附近(P_1, P_3, P_4, P_6)、叶轮出口附近压力侧分流流道(P_{15}, P_{17}, P_{18})、叶轮出口附近吸力侧分流流道(P_{28}, P_{30}) 3 个区域。其中 P_{17}, P_{18} 效应系数最大,说明叶轮的轮盘面在该位置对性能影响最大。进口区域的高阶效应较为明显,这是由于该区域对通流面积有影响,一定程度上控制着流量及激波分布情况,因此对后续流动的影响较大。

其他参数不变的情况下,分别改变上述各敏感参数,观察最高绝热效率的变化情况,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出,各控制参数在其取值区间内对效率的影响都是单调的,且参数一阶效应占主导,因此其余参数的取值对下列趋势影响不大,这说明人为给定的取值区间较保守,适当扩大取值范围有可能获得更高的性能。在 $P_1, P_3, P_4, P_6, P_{28}$ 位置处,轮盘面凹陷有助于最高效率的提升,而在 $P_{15}, P_{17}, P_{18}, P_{30}$ 位置处,轮盘面凸起有助于最高效率的

提升。根据文献[13]的分析,这可能与进口叶尖处激波-泄漏流结构的改善以及出口角区低速流体的减少有关。

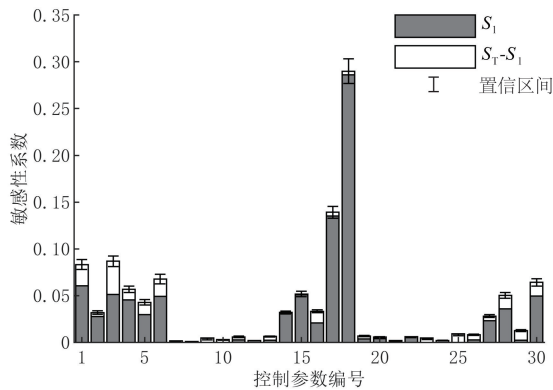


图 6 控制参数对最高绝热效率的主效应及总效应系数
Fig. 6 Main effect and total effect indices of maximum isentropic efficiency under 30 control parameters

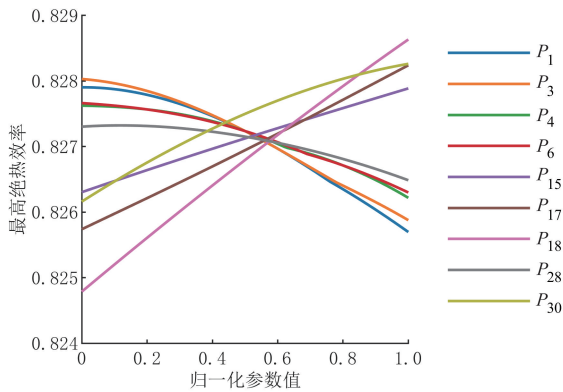


图 7 最高绝热效率随关键控制参数的变化
Fig. 7 Variation of maximum isentropic efficiency with critical control parameters

2.2 压比敏感性分析

最高效率点处的总压比对控制参数的敏感性系数如图 8 所示,其中 $\sum S_i = 0.9922$, $\sum S_{Ti} = 1.1920$ 。由图 8 可以看出,各参数对于压比的影响以一阶效应为主,一阶效应对输出的影响超过 99%,位于叶轮出口附近的参数($P_{17}, P_{18}, P_{29}, P_{30}$)对总压比的影响最显著。在其余参数不变的情况下,最高效率处的总压比随关键控制参数的变化如图 9 所示。由图 9 可以看出,这些位置处轮盘面的凸起将导致叶轮压比的下降,结合 2.1 小节分析,由于 P_{17}, P_{18}, P_{30} 同样是对效率影响较大的参数,这说明非轴对称轮盘面提升效率的同时需要牺牲一定的压比,对于初始设计时压比留有一定裕度的叶轮,非轴对称轮

盘面优化能够获得更好的效果。

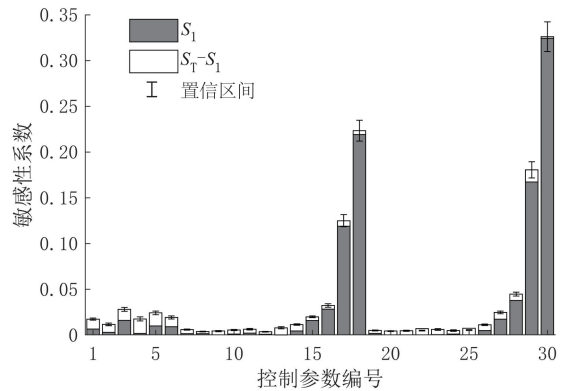


图 8 控制参数对最高效率处总压比的主效应及总效应系数
Fig. 8 Main effect and total effect indices of total-to-total pressure ratio at maximum efficiency under 30 control parameters

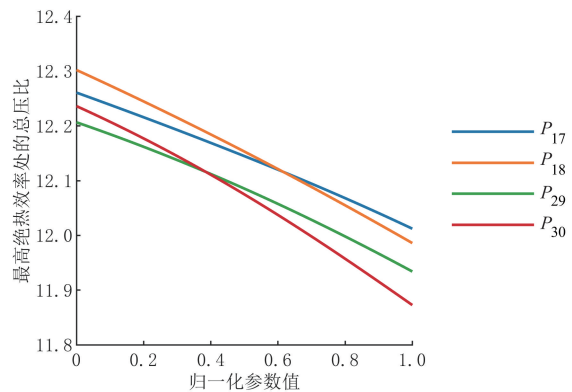


图 9 最高效率处的总压比随关键控制参数的变化
Fig. 9 Variation of total-to-total pressure ratio at maximum efficiency with critical control parameters

2.3 堵塞流量敏感性分析

堵塞流量对控制参数的敏感性系数如图 10 所示,其中 $\sum S_i = 0.9757$, $\sum S_{Ti} = 1.0781$ 。由图 10 可知,堵塞流量仅与叶轮进口附近的参数($P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$)有关,这是因为叶轮的堵塞流量仅与喉部面积有关,离心叶轮的喉部一般位于进口附近。在其余参数不变的情况下,堵塞流量随关键控制参数变化如图 11 所示。由图 11 可以看出,在这些位置处,轮盘面的凹陷有利于增大堵塞流量,结合 2.1 小节的分析可知,进口附近轮盘面的凹陷还有利于最高效率的提升。因此,对于高压比离心叶轮,进口附近轮盘面的凹陷可以在不影响压比的情况下改善叶轮的堵塞情况并提升效率。

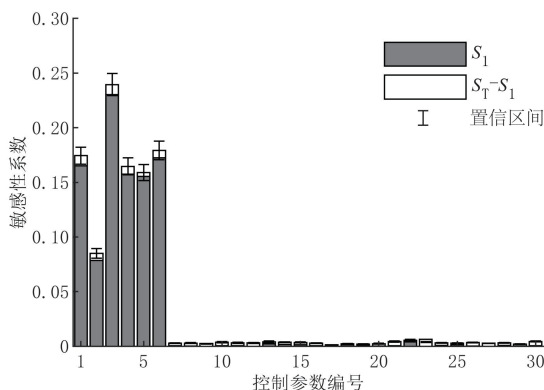


图 10 控制参数对堵塞流量的主效应及总效应系数

Fig. 10 Main effect and total effect indices of mass-flow of choke under 30 control parameters

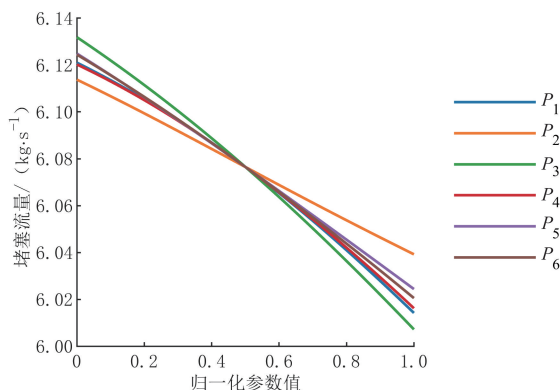


图 11 堵塞流量随关键控制参数的变化

Fig. 11 Variation of mass-flow of choke with critical control parameters

2.4 工况范围敏感性分析

工况范围对控制参数的敏感性如图 12 所示,其中 $\sum S_i = 0.6104$, $\sum S_{Ti} = 3.4594$ 。由图 12 可知,对于工况范围来说,参数的高阶效应对输出有着较为显著的影响,且大多数参数对工况范围的影响都比较显著,其中叶轮的进出口附近相较于其他位置影响更为明显。这说明轮盘面对于工况范围的调控作用并非源于局部区域的流动控制,也不是单纯因为堵塞裕度的提升,而是由于多个参数间对上下游流动的协调控制作用。由于计算得到的二阶效应占比较低,可知能够对工况范围起到较显著影响的轮盘面区域至少由 3 个及以上的控制点所控制。

总的来说,不同于效率、压比及堵塞流量,控制参数对工况范围的影响存在着复杂的高阶交互作用。限于当前的数值模拟方法对叶轮失速点的精确预测能力并不强以及 Sobol 法对于单项高阶敏感度

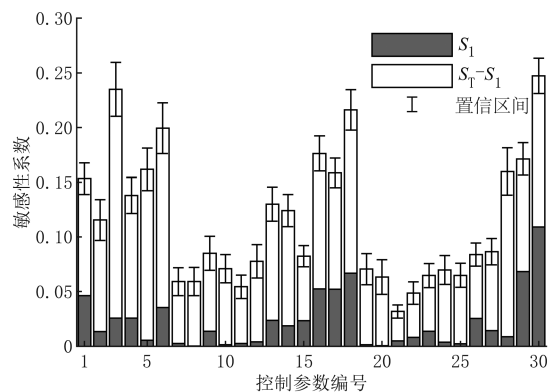


图 12 控制参数对工况范围的主效应及总效应系数

Fig. 12 Main effect and total effect indices of flow range under 30 control parameters

计算代价较高,轮盘面对于高压比离心叶轮工况范围的具体控制作用还有待进一步的研究。

2.5 关键参数控制机理分析

为了进一步探究非轴对称轮盘面对气动性能影响的流动机理,选取了同时对效率及压比均有显著效应的参数 P_{17} 、 P_{18} ,通过数值模拟结果研究其对叶轮出口附近的流动造成的影响。这里保持其余参数不变,且 P_{17} 、 P_{18} 为 5 mm,通过数值模拟计算其性能曲线,并与原型叶轮进行对比,结果如图 13 所示。由图 13 可以看出,当叶轮出口附近压力侧流道凸起后,效率提升了约 0.25%,而压比下降了约 0.2,这相当于 P_{17} 、 P_{18} 两者影响的线性叠加,与上文中的分析结果是一致的。此外,若以压比正斜率处界定失速点,轮盘面变形后的叶轮将具有更大的失速裕度,由于堵塞流量未发生变化,因此较原叶轮具有更宽的工况范围。

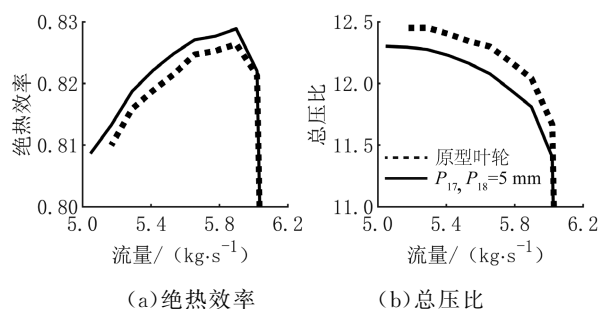


图 13 关键控制参数改变前后的性能对比

Fig. 13 Performance comparison before and after critical parameters are changed

选取最高效率点处(流量为 $5.9 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)的流场进行分析,轮盘面变形前后叶轮出口附近的相对马赫数云图如图 14 所示。由图 14 可以看出,当轮

盘面凸起后,压力侧分流流道的相对马赫数有所提升,这一定程度上减小了该流道内低速区的面积,改善了分流叶片吸力侧叶顶角区的流动状况。叶轮出口处的低速区会导致该处的气流在无叶扩压器中流动角较大,一方面增大了气流在扩压器中的行程,使摩擦损失增加,级效率下降;另一方面在小流量工况下会形成回流,减小叶轮的工况范围。因此,参数 P_{17} 、 P_{18} 会影响叶轮的效率及工况范围。由图 14 可以看出,虽然吸力侧分流流道未发生变形,但其相对马赫数依然有一定的提升,这说明轮盘面变形能够一定程度上影响流量分配。这种影响导致了参数间产生了高阶效应,即不同区域内的参数会影响气流的流量在整个流道内的分配情况,这可能是轮盘面几何影响工况范围的重要因素,工况范围受高阶效应影响较为明显。

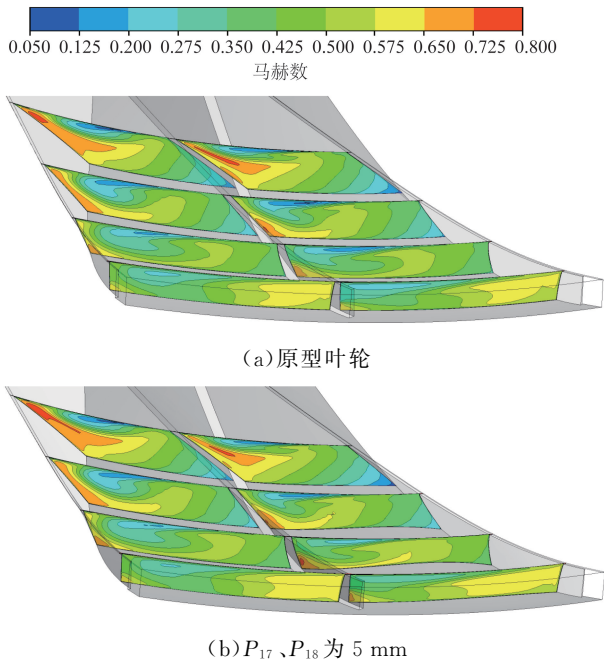


图 14 关键控制参数改变前后叶轮出口附近的相对马赫数云图
Fig. 14 Relative Mach number around impeller outlet before and after critical parameters are changed

叶轮压比的变化可以利用出口速度三角形进行分析,关键控制参数的变化对叶轮出口速度三角形的影响如图 15 所示,图中 w 为相对速度, u 为轮周速度, c 为绝对速度。由图 15 可以看出,由于出口轮盘面的凸起,平均相对速度增加了 Δw ,则根据矢量叠加法则,绝对速度由 c 变为 c' ,出口绝对速度的周向分量由 c_u 减小为 c'_u ,这导致了叶轮理论欧拉功的下降,使得总压比有所下降。因此,出口附近的轮

盘面通过控制 c_{2u} 改变压比。

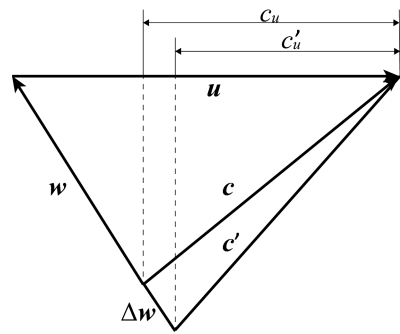


图 15 关键控制参数改变前后叶轮出口的速度三角形示意图
Fig. 15 Schematic diagram of the velocity triangle at the impeller outlet before and after critical parameters are changed

2.6 基于敏感性分析的快速经验优化

敏感性分析的结果能够对非轴对称轮盘面的优化工作起到指导性作用。由于除工况范围外,离心叶轮的效率、压比及堵塞流量所对应的敏感参数都以一阶效应为主,即各参数能够相对独立地对气动性能造成影响,因此可以简单地通过人为给定参数取值的方式达到预期的优化效果。根据敏感参数对气动性能的影响规律,对控制参数取值如表 2 所示,对应的几何外形如图 16 所示。

表 2 控制参数的取值

Table 2 Values of control parameters

参数	取值/mm	参数	取值/mm	参数	取值/mm
P_1	-10	P_{11}	0	P_{21}	0
P_2	0	P_{12}	0	P_{22}	0
P_3	-10	P_{13}	0	P_{23}	0
P_4	-10	P_{14}	0	P_{24}	0
P_5	0	15	5	P_{25}	0
P_6	-10	P_{16}	0	P_{26}	0
P_7	0	P_{17}	5	P_{27}	0
P_8	0	P_{18}	5	P_{28}	-5
P_9	0	P_{19}	0	P_{29}	-5
P_{10}	0	P_{20}	0	P_{30}	0

参数 P_1 、 P_3 、 P_4 、 P_6 的取值使轮盘面在进口附近产生特定形状的凹陷,用于增大堵塞裕度并提升效率;参数 P_{15} 、 P_{17} 、 P_{18} 的取值使压力侧流道的轮盘面在出口附近凸起,用于提升叶轮效率,但会使压比有所降低;参数 P_{28} 、 P_{29} 的取值使吸力侧流道的轮

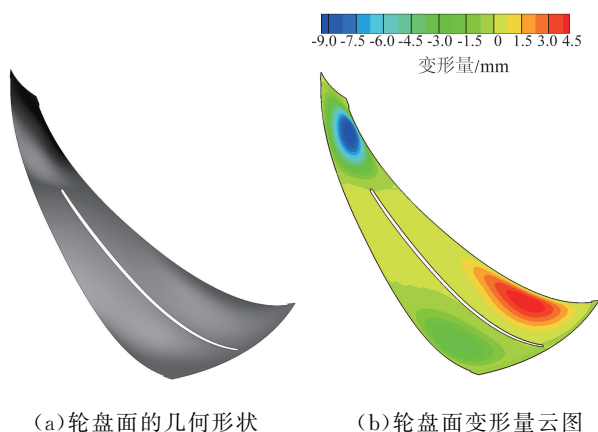


图16 轮盘面几何形状及变形量云图

Fig. 16 Hub geometry and deformation contour

盘面在出口附近凹陷,其中 P_{28} 用于提升效率, P_{29} 由于对效率不敏感而对压比敏感,可以用于抵消 P_{17} 、 P_{18} 带来的压比下降的效应;而参数 P_{30} 对压比的敏感性大大超过了其对效率的敏感性,利用 P_{30} 提升效率会显著降低压比,因此权衡后使其取值为0;其余参数均取值为0。

通过敏感性分析的结果从经验上给定参数取值后,优化叶轮的级性能与原型叶轮的对比如图17所示。优化后,叶轮的最高效率提升了0.6%,设计点效率提升了0.9%,工况范围增加了2%,且总压比在最高效率处及设计点处均未下降,小流量工况下压比下降约0.1。叶轮的性能改变基本与预期相符。说明敏感性分析的结果可有效指导轮盘面优化,大大缩短优化周期,降低优化成本。

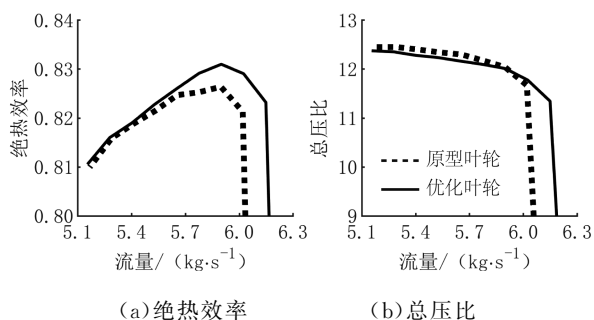


图17 优化叶轮与原型叶轮性能对比

Fig. 17 Performance comparison before and after optimization

3 结 论

本文分析了非轴对称轮盘面技术应用于高压比离心叶轮时,轮盘面上的控制参数对叶轮性能的敏感性,得到如下主要结论:

(1)进口附近的轮盘面控制参数主要影响叶轮的最高效率及堵塞流量,该位置处的轮盘面凹陷有利于提升最高效率并增大堵塞流量;

(2)叶轮出口压力侧分流流道附近的控制参数主要影响叶轮的最高效率和最高效率点处对应的压比,该位置处的轮盘面凸起有利于最高效率的提升,但会降低叶轮的压比;

(3)不同于效率、压比及堵塞流量,轮盘面控制参数对工况范围的影响存在着复杂的高阶交互作用,能够对工况范围起到较显著影响的轮盘面区域至少由3个及以上的控制点所控制;

(4)敏感性分析的结果可以对非轴对称轮盘面优化工作起到指导性作用,有效缩短优化周期,从而降低优化成本。

参考文献:

- [1] IBARAKI S, MATSUO T, KUMA H, et al. Aerodynamics of a transonic centrifugal compressor impeller [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 346-351.
- [2] HIGASHIMORI H, HASAGAWA K, SUMIDA K, et al. Detailed flow study of Mach number 1.6 high transonic flow with a shock wave in a pressure ratio 11 centrifugal compressor impeller [J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(4): 473-481.
- [3] IBARAKI S, MATSUO T, YOKOYAMA T. Investigation of unsteady flow field in a vaned diffuser of a transonic centrifugal compressor [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(4): 686-693.
- [4] BULOT N, TRÉBINJAC I, OTTAVY X, et al. Experimental and numerical investigation of the flow field in a high-pressure centrifugal compressor impeller near surge [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Power and Energy, 2009, 223(6): 657-666.
- [5] RODGERS C. Flow ranges of 8.0:1 pressure ratio centrifugal compressors for aviation applications [C]// ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. New York, NY, USA: ASME, 2005: 801-811.
- [6] WANG X F, XI G, WANG Z H. Aerodynamic optimization design of centrifugal compressor's impeller with Kriging model [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2006, 220(6): 589-597.
- [7] 傅珏, 蒋伟, 柳一鸣, 等. 叶顶间隙几何不确定性对离心叶轮气动性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 51-57.

- FU Jue, JIANG Wei, LIU Yiming, et al. Influence of tip clearance geometrical uncertainties on the aerodynamic performance of centrifugal impellers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 51-57.
- [8] 李琛玺, 王静, 宋立明, 等. 高压比离心叶轮气动强度多学科优化与知识挖掘 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(5): 102-111.
- LI Chenxi, WANG Jing, SONG Liming, et al. Aero-mechanical multidisciplinary optimization and knowledge discovery of high pressure ratio centrifugal impeller [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(5): 102-111.
- [9] 赵会晶, 王志恒, 唐永洪, 等. 叶片前缘倾掠对离心叶轮气动性能的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(11): 1-7.
- ZHAO Huijing, WANG Zhiheng, TANG Yonghong, et al. Effects of blade leading edge lean and sweep on the aerodynamic performance of centrifugal impellers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(11): 1-7.
- [10] 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 31-35.
- LIU Xiaomin, ZHANG Wenbin. Multi-objective automatic optimization design of centrifugal impeller based on genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(1): 31-35.
- [11] LI Xiaojian, ZHAO Yijia, LIU Zhengxian. A novel global optimization algorithm and data-mining methods for turbomachinery design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(2): 581-612.
- [12] JI Cheng, WANG Zhiheng, XI Guang. Computer 3D vision-aided full-3D optimization of a centrifugal impeller [J]. Journal of Turbomachinery, 2022, 144(9): 091011.
- [13] JI Cheng, WANG Zhiheng, TANG Yonghong, et al. A flow information-based prediction model applied to the nonaxisymmetric hub optimization of a centrifugal impeller [J]. Journal of Mechanical Design, 2021, 143(10): 103502.
- [14] GARSON G D. Interpreting neural-network connection weights [J]. AI Expert, 1991, 6(4): 46-51.
- [15] SALTELLI A, MARIVOET J. Non-parametric statistics in sensitivity analysis for model output: a comparison of selected techniques [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1990, 28(2): 229-253.
- [16] CHOI J Y, CHOI C H. Sensitivity analysis of multilayer perceptron with differentiable activation functions [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1992, 3(1): 101-107.
- [17] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 9-16.
- CAI Yi, XING Yan, HU Dan. On sensitivity analysis [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2008, 44(1): 9-16.
- [18] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 2000, 42(1): 55-61.
- [19] HORNBERGER G M, SPEAR R C. Approach to the preliminary analysis of environmental systems [J]. Journal of Environmental Management, 1981, 12(1): 7-18.
- [20] MORRIS M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments [J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161-174.
- [21] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 55(1/3): 271-280.
- [22] SALTELLI A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices [J]. Computer Physics Communications, 2002, 145(2): 280-297.
- [23] SALTELLI A, ANNONI P, AZZINI I, et al. Variance based sensitivity analysis of model output design and estimator for the total sensitivity index [J]. Computer Physics Communications, 2010, 181(2): 259-270.
- [24] 刘欢, 吴琼莉, COURNÈDE P H. 不同抽样算法对Sobol 敏感性分析影响的研究 [J]. 数学物理学报, 2018, 38(2): 372-384.
- LIU Huan, WU Qiongli, COURNÈDE P H. Research on the effects of different sampling algorithm on Sobol sensitivity analysis [J]. Acta Mathematica Scientia, 2018, 38(2): 372-384.
- [25] SOBOL' I M. On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals [J]. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1967, 7(4): 86-112.

(编辑 赵炜 杜秀杰)